

网络出版时间:2020-06-01 10:45 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2020.12.003
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20200529.0830.003.html

灌草立体配置对退化草地土壤水分和养分的影响

梁方晖,赵凌平,谭世图,魏楠,赵芙蓉

(河南科技大学 动物科技学院,河南 洛阳 471000)

【摘要】【目的】比较灌草立体配置模式下 3 种不同生境的土壤水分、养分和植物根系相关参数的差异,探究灌草立体配置 30 年对退化草地土壤水分和养分以及植物根系的影响,为黄土高原水土保持和生态恢复提供理论依据。【方法】以位于黄土高原云雾山国家草原自然保护区种植 30 年的人工柠条和野山桃搭配灌丛带样地为研究对象,采集灌丛带内部、灌丛带边缘和灌丛带外部不同土层的土样和植物根系,比较 3 种位置下土壤水分、养分含量和植物根系特征的差异,并分析了根长与土壤水分和养分含量的相关性。【结果】在 0~80 cm 土层,灌丛带内部的土壤含水量明显高于灌丛带边缘和灌丛带外部。在 0~80 cm 土层,随着土层深度增加,灌丛带 3 个位置土壤全氮、碱解氮和有机碳含量均呈下降趋势,而全磷含量变化不明显;在同一土层,灌丛带内部的全氮、碱解氮和有机碳含量均明显高于灌丛带边缘和灌丛带外部。在灌丛带内部、灌丛带边缘和灌丛带外部 3 个位置,植物根系生物量呈减小的趋势。从垂直分布来看,灌丛带内部、灌丛带边缘和灌丛带外部 0~15 cm 土层的植物根系生物量分别占 0~40 cm 土层植物根系生物量的 90.86%, 90.79%, 92.91%,说明植物根系生物量主要集中分布于 0~15 cm 土层。3 个取样位置中,灌丛带内部植物根长、根表面积和根体积均最大。相关性分析表明,灌丛带植物根长与 0~20 cm 土层的土壤含水量, 0~40 cm 土层土壤有机碳和全氮、0~80 cm 土层碱解氮均呈显著或极显著正相关。【结论】在黄土高原退化草地上进行灌草立体配置可以促进植物根系生长,提高土壤水分和养分含量,有利于退化草地的恢复。

【关键词】 灌草立体配置;土壤水分;土壤养分;典型草原;根系形态特征

【中图分类号】 S157.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2020)12-0018-08

Influences of shrub-grass patterns on soil water and nutrient of grassland

LIANG Fanghui, ZHAO Lingping, TAN Shitu, WEI Nan, ZHAO Furong

(College of Animal Science and Technology, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: 【Objective】By comparing the differences of soil water, nutrient and plant root in three different habitats under shrub-grass patterns, the effects of shrub-grass patterns over 30 years on soil water, nutrient and plant root in degraded grassland were explored to offer references for soil and water conservation and ecological restoration on the Loess Plateau. 【Method】The shrub sample sites of 30 years old *Caragana korshinskii* and *Amygdalus davidiana* in the Yunwu Mountain National Nature Reserve were selected and soil samples and plant roots were collected from different soil layers inside, near edge and outside of the shrub. The differences in soil water and nutrient and root characteristics were compared, and the relationships between root length and soil water and nutrient were analyzed. 【Result】In the 0—80 cm soil

【收稿日期】 2019-11-04

【基金项目】 国家重点研发计划子课题(2018YFD0505001);国家自然科学基金青年基金项目(31302013);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(A314021402)

【作者简介】 梁方晖(1995—),男,河南濮阳人,在读硕士,主要从事草业科学研究。E-mail:lfh126901@163.com

【通信作者】 赵凌平(1983—),女,河南漯河人,讲师,博士,主要从事恢复生态和草地管理研究。E-mail:zlp19830629@163.com

layer, soil water content inside shrub was significantly higher than the edge and outside. With the increase of soil depth, the contents of total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen and organic carbon in the three locations showed decreasing trend, while total phosphorus had no significant change. In same soil layer, contents of total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen and organic carbon inside shrub were significantly higher than the edge and outside. The root biomass showed a decreasing trend of inside > edge > outside. From vertical distribution, root biomasses of inside, near edge and outside of shrub in the 0–15 cm soil layer accounted for 90.86%, 90.79% and 92.91% of the total root biomass in the 0–40 cm soil layer, indicating that the root biomass mainly distributed in the 0–15 cm soil layer. The biomass, length, surface area and volume of roots inside shrub were the largest among the three sampling locations. Correlation analysis showed that the root length in shrub was significantly or extremely significantly positively correlated with soil water in the 0–20 cm soil layer, organic carbon and total nitrogen in the 0–40 cm soil layer, and alkali-hydrolyzable nitrogen in the 0–80 cm soil layer. 【Conclusion】 The shrub-grass patterns on the Loess Plateau would promote root growth, increase soil water and soil nutrient content, and be conducive to restoration of degraded grassland.

Key words: shrub-grass patterns; soil water; soil nutrient; typical steppe; root morphological trait

水土流失和植被退化是黄土高原面临的主要环境问题,二者相互影响^[1]。黄土高原水土流失治理主要采用水土保持工程措施、生物措施和耕作措施相结合的方式,其中生物措施又称水土保持林草措施,在水土流失和生态修复方面具有显著优势,被认为是防治水土流失的根本措施,也是黄土高原沟壑区固沟保塬的重要举措。黄土高原西部适宜灌木林生长的荒山荒坡地占坡地总面积的 65%^[2]。为改变荒山荒坡水土流失、土壤水分亏缺和草地退化,采取了一系列措施来增加土壤水分,促进草地植被的恢复。1985 年在黄土高原荒山荒坡采用工程整地措施和生物配置措施种植了大量的人工灌丛林,进行了灌草立体配置。柠条(*Caragana korshinskii*)和野山桃(*Amygdalus davidiana*)是西部水土保持和固沙造林的重要树种,也是适宜该区灌草立体配置建造的优良灌木类型^[3-4]。但是 30 年来灌草立体配置对土壤水分和养分影响的研究尚无明确结论。

目前,国内外学者对人工灌丛林作了许多研究,但大多数研究侧重于群落特征、物种多样性^[5-7]。在黄土高原地区,以往灌草立体配置的研究主要集中于土壤水分和水分调控方面^[2,8],而有关灌草立体配置对退化草地土壤养分和植被根系影响的报道较少。程积民等^[9]研究了灌草配置 15 年对土壤水分的影响,指出水平阶整地的灌草立体配置可提高 1.6%~5.0% 的土壤含水量,但是灌草立体配置 30 年后土壤含水量的动态变化需要进一步分析。针对以上问题提出 2 个假设:(1)灌草立体配置提高了退化草地的土壤水分和养分;(2)土壤水分和养分的提

高与植物根系特征密切相关。为此,本试验选取种植 30 年的人工柠条和野山桃搭配灌草丛为研究对象,比较 3 种不同生境(灌丛带内部、灌丛带边缘和灌丛带外部)中的土壤水分、养分和植物根系相关参数的差异,探究灌草立体配置 30 年对退化草地土壤水分和养分的影响,为黄土高原水土保持和生态恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区域位于黄土高原云雾山国家草原自然保护区(36°13′–36°19′N, 106°24′–106°28′E),海拔 1 800~2 180 m。该区是黄土高原典型草原带的代表性区域,为温带大陆性半干旱季风气候。年平均温度 5℃, ≥10℃ 的年积温为 2 370~2 882℃,气温最低月为 1 月(平均最低气温 -14℃),气温最高月为 7 月(22~25℃)。年平均降雨量 400~450 mm,其中 70% 以上集中在 7–9 月。年平均蒸发量 1 330~1 640 mm,干燥度为 1.5~2.0。试验区人工灌丛林于 1985 年开始种植,灌木主要以柠条(*Caragana korshinskii*)和野山桃(*Amygdalus davidiana*)为主,灌丛下主要以旱生和中旱生草本植物为主,优势种为本氏针茅(*Stipa bungeana*)、甘青针茅(*Stipa przewalskyi*)、大针茅(*Stipa grandis*)、干生苔草(*Carex aridula*)和百里香(*Thymus mongolicus*)等。

1.2 野外采样与样品分析

选取种植 30 年的人工柠条和野山桃搭配灌丛

带样地为研究对象,样地位于阴坡,坡度 15°~20°,海拔 2 019 m。该地区的地带性土壤主要以黑垆土和黄绵土为主,表层有沙覆盖,砂粒含量占土壤总质量的 64%~73%,粘粒含量占土壤总质量的 17%~20%。于 2018 年 8 月开展群落调查,此时植物处于

生长发育的高峰期。灌草立体配置以前,该样地为退化的本氏针茅群落。灌丛带成条带状分布,灌丛带与带之间的宽度为 1.5~2.0 m,灌木株距 0.5~0.8 m,具体配置参考文献[9]。灌木柠条和野山桃的生长情况见表 1。

表 1 2 种灌木植物生长状况
Table 1 Morphological characteristics of two suffruticosa plants

灌木类型 Shrub species	冠幅/cm ² Crown area	基径/cm Branch diameter	株高/m Height	地上生物量/(g·m ⁻²) Aboveground biomass
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	303×299	26	2.14±0.12	1 654.65
野山桃 <i>Amygdalus davidiana</i>	115×134	28	1.16±0.13	639.50

在样地内,随机设置 15 个 5 m×5 m 的样方。在每个大样方内,参考柴华等^[10]的取样方法,根据距离灌丛带的位置,分别在灌丛带内部、灌丛带边缘(距灌丛 0.5 m)和灌丛带外部(灌丛带与灌丛带中间,为草地,距灌丛带 2 m),用直径 4 cm 土钻分别取 0~20,20~40,40~60 和 60~80 cm 土层土样,从东南西北 4 个方位取 4 钻按土层混合(图 1)。

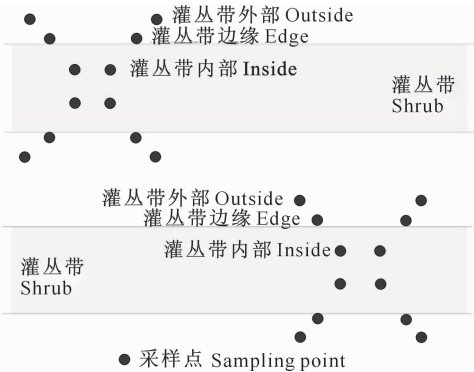


图 1 野外取样点的分布情况

Fig. 1 Sampling distribution of field experiment

土壤样品均在天气晴朗且地面干燥的环境下采集。所取土样分为两份,一份样品放入铝盒中,称重后放入烘箱,105 ℃下烘干至质量恒定,用于测量土壤含水量;另一份样品装入自封袋编号,带回室内进行分析。将自封袋中的土壤样品置于阴凉通风处自然风干,然后挑选出土壤样品中所有根系、凋落物与小块砾石后,磨细过孔径 2 mm 筛备用。土壤含水量用重量法^[11]测定(105~110 ℃,10 h),土壤有机碳含量用重铬酸钾-外加加热含量法^[12]测定,土壤碱解氮含量采用碱解扩散法^[13]测定,土壤全氮含量用凯氏定氮仪^[13]测定,土壤全磷含量用酸熔钼锑抗比色法^[14]测定。

在样地内,根据距离灌丛带的位置,分别在灌丛带内部、灌丛带边缘和灌丛带外部(灌丛带与灌丛带

中间),用直径 9 cm 根钻分别取 0~15,15~30 和 30~40 cm 土层植物根系样品,将同层不同位置的 3 钻根系样品混合装入自封袋编号,回到实验室待泥水冲干净后即可达到根系与土壤完全分离的目的,再用镊子将根系挑出,清除细沙,挑除枯枝、叶和苔藓等杂物,将洗净的根系编号,称重后自然风干。将根系置于透明塑料根盘内,在 300 dpi 分辨率下进行扫描并获取根系图像,之后利用 WinRhizoPro 软件对根系图像进行分析,以获得根长、根表面积和根体积等相关重要指标。根系生物量的计算公式^[15]如下:

根系生物量(g/m²)=根系质量/根系采集面积。

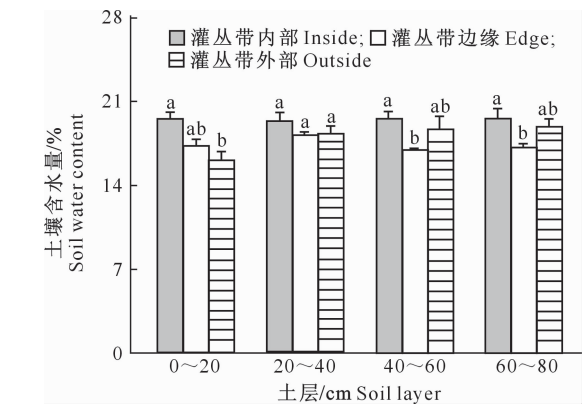
1.3 数据分析

使用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行统计分析,用“平均值±标准误”表示。采用单因素方差分析比较灌丛带不同取样位置之间土壤水分和养分的差异显著性,使用 Tukey-test 进行两两比较;采用线性回归分析比较根长与土壤水分和养分的相关关系。

2 结果与分析

2.1 灌丛带不同取样位置土壤含水量的变化

灌丛带不同土层 3 个取样位置土壤含水量的变化见图 2。由图 2 可知,在 0~20 cm 土层,灌丛带内部土壤含水量较灌丛带外部显著高 21.3%($P<0.05$),但灌丛带内部与灌丛带边缘差异不显著($P>0.05$)。在 20~40 cm 土层,灌丛带 3 个位置土壤含水量差异均不显著($P>0.05$)。在 40~60 和 60~80 cm 土层,灌丛带内部土壤含水量显著高于灌丛带边缘,但与灌丛带外部差异不显著($P>0.05$)。可知灌丛带内部土壤含水量最高,灌木的种植主要提高了灌丛带内部的土壤含水量。



图柱上标不同小写字母表示不同取样位置间差异显著($P<0.05$)
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at different sampling sites ($P<0.05$)

图 2 灌丛带不同土层 3 个取样位置土壤含水量的变化
Fig. 2 Changes of soil water content at three sampling sites in different soil layers in the shrub

2.2 灌丛带不同取样位置土壤养分含量的变化

表 2 显示,在土壤剖面垂直方向上,灌丛带 3 个位置的土壤全氮、碱解氮和有机碳含量均随土层的

增加呈下降趋势,而全磷含量变化不显著。在 0~20 cm 土层中,灌丛带内部的土壤全氮、碱解氮和有机碳含量均最高,显著高于灌丛带外部($P<0.05$),但与灌丛带边缘差异不显著($P>0.05$)。在 20~40 cm 土层,灌丛带内部土壤全氮和有机碳含量分别比灌丛带外部显著增加了 43.5% 和 19.0% ($P<0.05$);灌丛带内部土壤碱解氮含量较灌丛带边缘和外部分别显著增加了 26.7% 和 23.0% ($P<0.05$)。在 40~60 和 60~80 cm 土层中,土壤全氮、碱解氮和有机碳含量在 3 个取样位置的差异均不显著 ($P>0.05$)。可见,灌木的种植提高了典型草原表层土壤的全氮、碱解氮和有机碳含量,灌丛带内部的养分含量集聚效果显著,而对深层土壤的全氮、碱解氮和有机碳含量影响不明显。在 0~20 cm 土层,灌丛带外部土壤全磷含量较灌丛带边缘显著提高了 15.4% ($P<0.05$),但与灌丛带内部差异不显著;在 20~40,40~60 和 60~80 cm 土层,土壤全磷含量在 3 个位置差异均不显著 ($P>0.05$),说明灌丛带外部的草地更有利于 0~20 cm 土层全磷含量贮藏。

表 2 灌丛带不同土层 3 个取样位置土壤养分含量的变化

Table 2 Changes of soil nutrient content at three sampling sites in different soil layers in the shrub

土壤养分 Soil nutrient	土层/cm Soil layer	灌丛带内部 Inside	灌丛带边缘 Edge	灌丛带外部 Outside
全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	0~20	1.75±0.17 a	1.32±0.10 ab	1.18±0.14 b
	20~40	1.42±0.18 a	1.03±0.09 ab	0.80±0.09 b
	40~60	0.85±0.26 a	0.79±0.15 a	0.60±0.14 a
	60~80	0.57±0.09 a	0.47±0.11 a	0.37±0.08 a
碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Alkali-hydrolyza- ble nitrogen	0~20	15.63±1.04 a	13.06±1.68 ab	9.33±0.83 b
	20~40	12.60±1.38 a	9.24±0.58 b	9.71±1.70 b
	40~60	11.01±2.83 a	8.68±1.38 a	7.09±2.01 a
	60~80	7.84±1.94 a	6.07±0.49 a	5.69±0.67 a
有机碳/(g·kg ⁻¹) Organic carbon	0~20	19.17±0.60 a	16.60±0.57 ab	16.39±0.61 b
	20~40	16.75±0.39 a	14.60±0.67 ab	13.56±0.98 b
	40~60	10.73±2.98 a	12.82±1.50 a	7.43±1.39 a
	60~80	9.70±0.31 a	7.13±2.64 a	5.76±1.78 a
全磷/(g·kg ⁻¹) Total phosphorus	0~20	0.74±0.23 ab	0.70±0.50 b	0.85±0.36 a
	20~40	0.79±0.30 a	0.72±0.71 a	0.76±0.71 a
	40~60	0.68±0.41 a	0.70±0.54 a	0.66±0.97 a
	60~80	0.74±0.14 a	0.63±0.36 a	0.67±1.01 a

注:同行数据后标不同小写字母表示不同取样位置间差异显著($P<0.05$)。表 3 同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at different sampling sites ($P<0.05$). The same for Table 3.

2.3 灌丛带不同取样位置植物根系特征的变化

2.3.1 根系生物量的分布特征 表 3 显示,在灌丛带内部、灌丛带边缘和灌丛带外部 3 个位置,植物根系生物量呈减小的趋势,表明距离灌木越近,植物根系生物量呈增大的趋势,说明灌丛带内部植物有发达的根系,根系的活力和生理功能较强。从垂直分布来看,灌丛带内部、灌丛带边缘和灌丛带外部 0~15 cm 土层的植物根系生物量分别占 0~40 cm 土

层植物根系生物量的 90.86%,90.79%,92.91%,说明植物根系生物量主要集中分布于 0~15 cm 土层,占到总根系生物量的 90% 以上。在 0~15 cm 土层,灌丛带内部的植物根系生物量显著高于灌丛带外部和灌丛带边缘($P<0.05$),灌丛带外部和灌丛带边缘差异不显著;在 15~30 cm 土层,灌丛带内部的植物根系生物量显著高于灌丛带外部 ($P<0.05$),灌丛带外部与灌丛带边缘差异不显著;在

30~40 cm 土层,灌丛带内部、灌丛带边缘和灌丛带外部提高了植物地下生物量。外部的植物根系生物量差异不显著。可见,种植灌

表 3 灌丛带不同土层 3 个取样位置植物根系生物量的变化

土层/cm Soil layer	灌丛带内部 Inside		灌丛带边缘 Edge		灌丛带外部 Outside	
	根系生物量/(g·m ⁻²)	比例/%	根系生物量/(g·m ⁻²)	比例/%	根系生物量/(g·m ⁻²)	比例/%
	Root biomass	Percent	Root biomass	Percent	Root biomass	Percent
0~15	23.47±1.78 a	90.86	16.47±0.80 b	90.79	15.33±0.67 b	92.91
15~30	1.15±0.16 a	4.45	0.93±0.03 ab	5.13	0.57±0.12 b	3.45
30~40	1.21±0.22 a	4.69	0.74±0.22 a	4.08	0.60±0.13 a	3.64

2.3.2 根系参数的分布特征 表 4 显示,取样位置对植物根长和根表面积影响显著($P<0.05$),但对植物根体积影响不显著($P>0.05$)。灌丛带内部植物的根长和表面积显著高于灌丛带外部,但与灌丛带边缘无显著差异。3 个取样位置中,灌丛带内部植物根长、根表面积和根体积均最大,分别比灌丛带外部增加了 53.2%,41.5%和 37.6%。

表 4 灌丛带不同取样位置植物根系参数的分布特征

样地 Sites	根长/cm Root length	根表面积/cm ² Root surface area	根体积/cm ³ Root volume
灌丛带内部 Inside	993.41±49.46 a	363.05±9.31 a	15.67±0.95 a
灌丛带边缘 Edge	817.28±124.55 ab	340.51±31.38 ab	12.25±0.50 a
灌丛带外部 Outside	648.48±15.78 b	256.56±19.85 b	11.39±2.95 a

注:同列数据后标不同小写字母表示不同取样点间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at different sampling sites ($P<0.05$).

2.3.3 灌木根长与土壤水分和养分的关系 分析植物根长与土壤含水量和养分的相关性,鉴于数据太多,故只列出了二者之间有显著或极显著关系的数据,结果见图 3~6。图 3~6 表明,植物根长与 0~20 cm 土层土壤含水量、有机碳,0~40 cm 土层土壤全氮含量,0~80 cm 土层土壤碱解氮含量均呈极显著正相关($P<0.01$),与 20~40 cm 土层土壤有机碳含量呈显著正相关($P<0.05$),但土壤全磷含量与根长之间无显著相关关系。可见,以柠条和野山桃为主的灌草立体配置中,0~20 cm 土层土壤含水量、有机碳和碱解氮的含量随着植物根长的增加而增大。

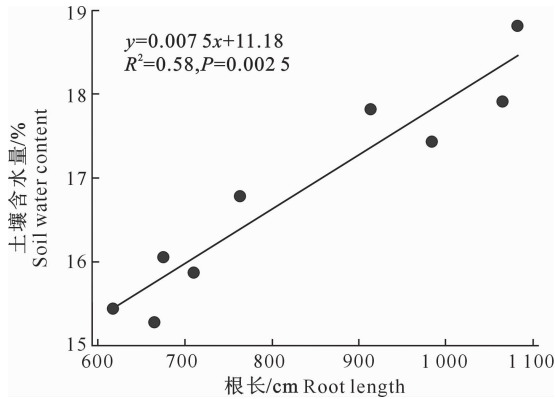


图 3 灌丛带植物根长与 0~20 cm 土层土壤含水量的关系
Fig. 3 Relationship between root length and 0—20 cm soil water content in different positions

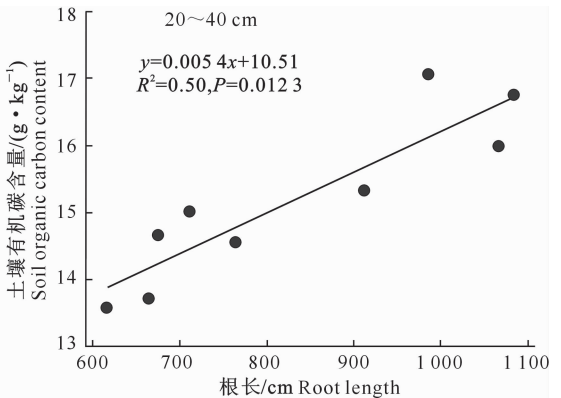
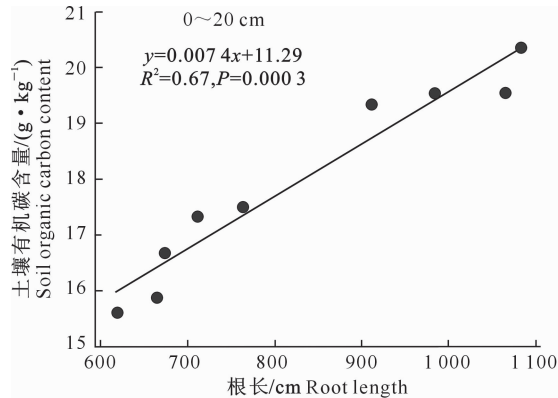


图 4 灌丛带植物根长与不同土层土壤有机碳含量的关系

Fig. 4 Relationship between root length and soil organic carbon in different positions

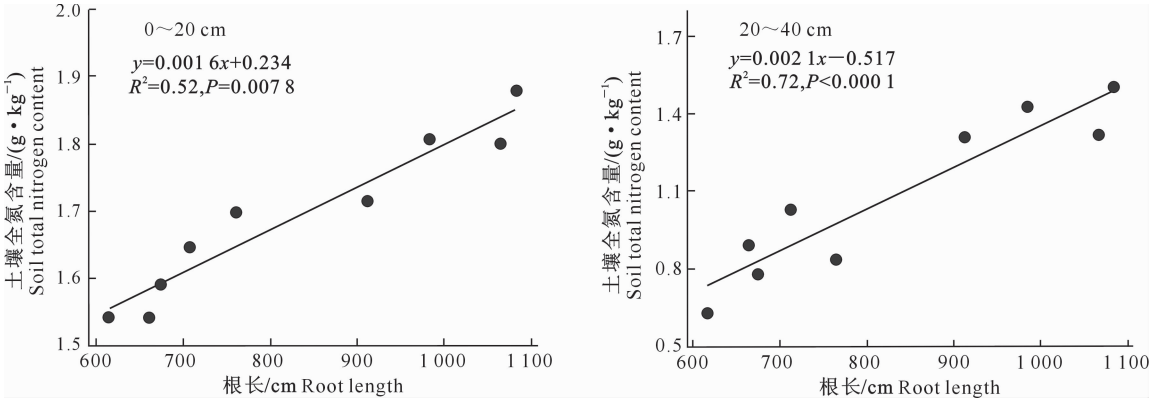


图 5 灌丛带植物根长与不同土层土壤全氮含量的关系

Fig. 5 Relationship between root length and soil total nitrogen content in different positions

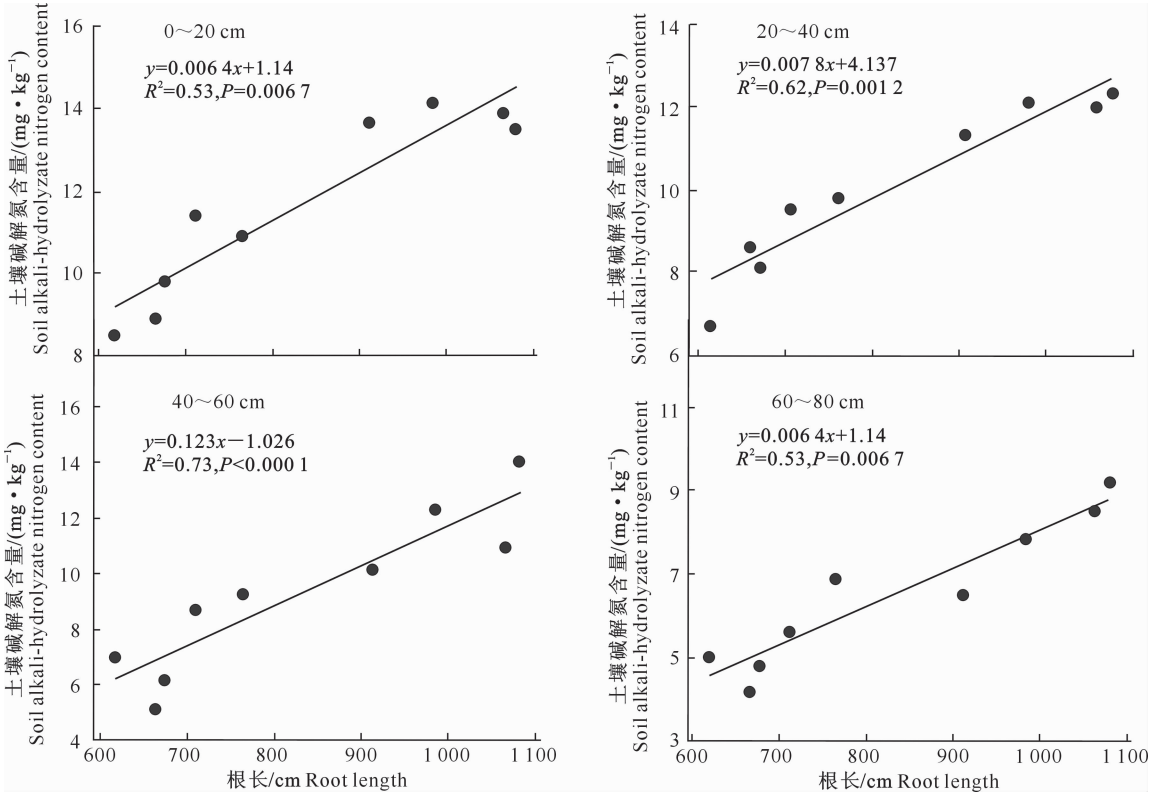


图 6 灌丛带植物根长与不同土层土壤碱解氮含量的关系

Fig. 6 Relationship between root length and soil alkali-hydrolyzable content in different positions

3 讨 论

在退化草地上进行灌草立体配置不仅影响着土壤资源的空间分布,还将改变土壤中水分、养分和根系等分配格局。本研究结果表明,在 0~20 cm 土层,灌丛带内部的土壤含水量明显高于灌丛带外部,这可能是由于在灌木阴影的庇护下减少了表层土壤水分的损失,而灌丛带边缘和外部因为没有灌木的庇护,裸地面积较多,蒸发量较大,表层土壤粗化,故灌丛带边缘和外部土壤含水量下降^[16]。灌木在减少地面蒸发的同时,会增加蒸腾量,但程积民等^[17]

的研究表明,柠条和野山桃灌丛带会在地下 1~2.7 m 产生土壤干层,根部吸收水分的主要来源在于深层土壤,同时蒸腾作用所消耗水分主要由植被根部运输,对 0~20 cm 土层影响较小。侯建秀等^[18]在干旱半干旱的古尔班通古特沙漠人工植被区研究发现,灌丛中央与边缘受到灌丛的遮挡,故其蒸发量远远低于灌丛外缘,一定程度上也减少了耗水量,提高了土壤含水量。此外,本研究中,灌丛带内部 40~80 cm 土层土壤含水量显著高于灌丛带边缘,这可能是由于柠条和野山桃属于深根性植物,在深层土壤中能够贮藏较多的水分,灌丛带内部更有利于生态系

统水分的保存^[19]。因此,灌丛带内部是土壤含水量的“优势生态区域”,更有利于保水。通过对比同研究区前期土壤水分的研究结果^[17],发现灌草立体配置 30 年土壤含水量比 15 年有明显增加,0~40 cm 土层的土壤含水量从 10.10% 提高到 18.14%,可见灌草立体配置 30 年提高了土壤的蓄水持水能力。

灌丛带不同位置对土壤养分的空间分布有着重要的影响。本研究表明,在 0~20 cm 土层,随着距离灌丛越近,土壤的有机碳、全氮和碱解氮含量均呈增加趋势,存在显著空间异质性,这是因为灌丛能够截取自身的枯落物、空气中的有机物质并通过降雨和自身的循环进入土壤,而有机质等是土壤全氮和速效氮的营养库,也是有机碳的主要来源^[20-21];此外柠条有较高的固氮能力,提高了养分吸收的有效性,这为灌丛带内部土壤全氮、有效氮和有机碳含量的保存提供了有利条件^[22]。可见,人工灌草立体配置下,灌丛带内部更有利于提高土壤的保水能力以及土壤有机碳、全氮、碱解氮含量。0~20 cm 土层,灌丛带外部土壤全磷含量明显高于灌丛带内部和边缘,这主要是因为土壤磷含量一部分来源于降雨,且在土壤中的移动性较低,所以灌丛带外部更有利于对降雨的吸收与利用^[23];灌木生长过程中对磷的需要较多,从而导致灌木根际土壤磷含量较低^[24]。

植物根系越发达,其根长、根表面积和根体积等参数越大,根系附着的生物量就越大,这是植物自身特性和外界环境协同作用的结果^[25]。本研究结果表明,距离灌丛的位置不同,其根系生物量和根系的分布特征也存在着差异,灌丛带外部、边缘和内部 3 个位置,根系生物量随着距离灌丛越近呈逐渐增大的趋势,同时灌丛带内部的根长和根表面积均显著高于灌丛带外部。可见,灌丛带内部的根系生长旺盛,根系的活力和生理功能较强。本研究中,植物根长与表层土壤碱解氮、有机碳、全氮含量及土壤含水量均呈极显著正相关关系。而根长是根系吸收土壤水分和养分功能的重要指标^[26]。因此,相对于其他 2 个取样位置,灌丛带内部的植物根系较发达,吸收和维持土壤中水分和养分的能力更强。

4 结 论

在黄土高原半干旱区,以柠条和野山桃为主的灌草立体配制模式对土壤含水量、有机碳、全氮和碱解氮含量有显著影响,植物根系的生物量、长度、表面积和体积均随着距离灌丛内部越近呈上升趋势。说明灌草立体配置模式可通过植物根系生长来维持

较高的土壤水分和肥力。在黄土高原半干旱区实施灌草立体配制模式 30 年,灌丛带内部比灌丛带边缘和外部能保持更高的土壤水分和养分,有利于退化草地的恢复。

[参考文献]

- [1] Fu B J, Liu Y, Lu Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [2] 程积民, 万惠娥, 王 静, 等. 半干旱区不同整地方式与灌草配置对土壤水分的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(3): 10-14. Cheng J M, Wan H E, Wang J, et al. Effects on soil moisture by different soil preparation methods and shrub-grass patterns in semi-arid area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(3): 10-14.
- [3] Jackso S T, Hobbs R J. Ecological restoration in the light of ecological history [J]. *Science*, 2009, 525(5940): 567-569.
- [4] 杨东东, 赵 伟, 陈 林, 等. 人工柠条林生物土壤结皮地表水文效应的季节转换 [J]. *西北植物学报*, 2018, 38(7): 1349-1356. Yang D D, Zhao W, Chen L, et al. Seasonal conversion of the effects of biological soil crusts on surface hydrology in the artificial caragana intermedia shrublands [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(7): 1349-1356.
- [5] 胡相明, 程积民, 万惠娥. 黄土丘陵区人工林下草本层植物的结构特征 [J]. *水土保持通报*, 2006, 26(3): 41-45. Hu X M, Cheng J M, Wan H E. Structure characteristics of herbages under five types of artificial forest plantations in Loess Hilly Region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(3): 41-45.
- [6] 白日军, 杨治平, 张 强, 等. 晋西北不同年限小叶锦鸡儿灌丛土壤氮矿化和硝化作用 [J]. *生态学报*, 2016, 36(24): 8008-8014. Bai R J, Yang Z P, Zhang Q, et al. Soil nitrogen mineralization and nitrification under *Caragana microphylla* shrubs of different ages in the northwestern Shanxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24): 8008-8014.
- [7] Naito A T, Cairns D M. Patterns and processes of global shrub expansion [J]. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(4): 423-442.
- [8] 张源润, 赵庆丰, 蔡进军, 等. 半干旱退化山区灌草立体配置与水分调控研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(7): 130-134. Zhang Y R, Zhao Q F, Cai J J, et al. Research on shrub and grass disposition and the soil moisture content regulation in semi-arid degenerated mountainous area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(7): 130-134.
- [9] 程积民, 万惠娥, 杜 锋. 黄土高原半干旱区退化灌草植被的恢复与重建 [J]. *林业科学*, 2001, 37(4): 50-57. Cheng J M, Wan H E, Du F. Recovery and reconstruction of degraded shrub-grass vegetation in semi-arid region of Loess Plateau [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(4): 50-57.

- [10] 柴 华,方江平,温 丁,等.内蒙古灌丛化草地取样位置对评估土壤碳氮贮量的影响 [J]. 草业学报,2014,23(6):28-35.
Chai H,Fang J P,Wen D,et al. Effect of sampling method on the estimation of soil carbon and nitrogen storages in thicketed semiarid grasslands [J]. Acta Prataculturae Sinica,2014,23(6):28-35.
- [11] 田宁宁,张建军,茹 豪,等.晋西黄土区水土保持林地的土壤水分和养分特征 [J]. 中国水土保持科学,2015,13(6):65-71.
Tian N N,Zhang J J,Ru H,et al. Soil moisture and nutrient characteristics of soil and water conservation forests in Loess Plateau of western Shanxi Province [J]. Science of Soil and Water Conservation,2015,13(6):65-71.
- [12] 刘 伟,程积民,高 阳,等.黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素 [J]. 土壤学报,2012,49(1):68-76.
Liu W,Cheng J M,Gao Y,et al. Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its influencing factors [J]. Acta Pedologica Sinica,2012,49(1):68-76.
- [13] 王晓岚,卡丽毕努尔,杨文念.土壤碱解氮测定方法比较 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2010(1):80-82.
Wang X L,Kl Bne,Yang W N. Comparison of methods for determining alkali-hydrolyzed nitrogen in soil [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science),2010(1):80-82.
- [14] 王彦丽,范 庭,王旭东,等.长期磷肥不均投入下黄土高原土壤磷素有效性及与土壤性质关系分析 [J]. 水土保持学报,2019,33(5):237-242,250.
Wang Y L,Fan T,Wang X D,et al. Analysis of phosphorus availability and its relationship with soil properties in the Loess Plateau under long-term imbalanced phosphorus input [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(5):237-242,250.
- [15] 苏纪帅,赵 洁,井光花,等.半干旱草地长期封育进程中针茅植物根系格局变化特征 [J]. 生态学报,2017,37(19):6571-6580.
Su J S,Zhao J,Jing G H,et al. Root pattern of Stipa plants in semiarid grassland after long-term grazing exclusion [J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(19):6571-6580.
- [16] 张义凡,陈 林,刘学东,等.荒漠草原 2 种群落灌丛堆土壤水分的空间特征 [J]. 西南农业学报,2017,30(4):836-841.
Zhang Y F,Chen L,Liu X D,et al. Spatial characteristics of soil moisture of 2 communities in desert grassland [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2017,30(4):836-841.
- [17] 程积民,杜 峰,万惠娥.黄土高原半干旱区集流灌草立体配置与水分调控 [J]. 草地学报,2000,8(3):210-219.
Cheng J M,Du F,Wan H E. Solid collocation of water collected shrub-grass and water regulation in semi-arid region of Loess Plateau [J]. Acta Agrestia Ainica,2000,8(3):210-219.
- [18] 侯建秀,张元明,陶 冶,等.沙漠水渠人工固沙区沙蒿和沙拐枣灌丛的土壤水分特征对比 [J]. 干旱地区农业研究,2011,29(4):164-167,173.
Hou J X,Zhang Y M,Tao Y,et al. Contrastive study on soil water content characters of *Artemisia arenaria* and *Calligonum mongolicum* shrubs in artificial sand-fixation area in gurbantunggut desert of northwest China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2011,29(4):164-167,173.
- [19] 彭海英,李小雁,童绍玉.内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响 [J]. 生态学报,2013,33(22):7221-7229.
Peng H Y,Li X Y,Tong S Y. Effects of shrub encroachment on biomass and biodiversity in the typical steppe of Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(22):7221-7229.
- [20] 熊小刚,韩兴国.内蒙古半干旱草原灌丛化过程中小叶锦鸡儿引起的土壤碳、氮资源空间异质性分布 [J]. 生态学报,2005,25(7):1678-1683.
Xiong X G,Han X G. Spatial heterogeneity in soil carbon and nitrogen resources, caused by *Caragana microphylla*, in the thicketing of semiarid grassland, Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(7):1678-1683.
- [21] 杨 阳,刘秉儒,宋乃平,等.人工柠条灌丛密度对荒漠草原土壤养分空间分布的影响 [J]. 草业学报,2014,23(5):107-115.
Yang Y,Liu B R,Song N P,et al. The effect of planted caragana density on the spatial distribution of soil nutrients in desert steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica,2014,23(5):107-115.
- [22] 钟 芳,赵 瑾,孙荣高,等.兰州南北两山五类乔灌木林草地土壤养分与土壤微生物空间分布研究 [J]. 草业学报,2010,19(3):94-101.
Zhong F,Zhao J,Sun R G,et al. Spatial distribution of soil nutrients and soil microbes in five arbore-bushe-grass lands at the south-north hills in Lanzhou, China [J]. Acta Prataculturae Sinica,2010,19(3):94-101.
- [23] 梁月明,苏以荣,何寻阳,等.喀斯特地区不同坡位条件下优势灌木根际与非根际土壤养分与 pH 的分布特征 [J]. 中国岩溶,2018,37(1):53-58.
Liang Y M,Su Y R,He X Y,et al. Distribution characteristics of soil nutrient and pH in rhizosphere versus non-rhizosphere from dominant shrub along different slope position in a Karst region [J]. Carsologica Sinica,2018,37(1):53-58.
- [24] Jing Z B,Cheng J M,Jin J W,et al. Revegetation as an efficient means of improving the diversity and abundance of soil eukaryotes in the Loess Plateau of China [J]. Ecological Engineering,2014,70:169-174.
- [25] 马海天才,张家成,刘 峰.川西北 4 种灌丛根系分布特征及对土壤养分的影响 [J]. 江苏农业科学,2018,46(11):222-227.
Ma H T C,Zhang J C,Liu F. Root distribution characteristics of 4 species of shrubs in northwest Sichuan and their effects on soil nutrients [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(11):222-227.
- [26] 王长庭,王启兰,景增春,等.不同放牧梯度下高寒小嵩草甸植被根系和土壤理化特征的变化 [J]. 草业学报,2008,17(5):9-15.
Wang C T,Wang Q L,Jing Z C,et al. Vegetation roots and soil physical and chemical characteristic changes in *Kobresia pygmaea* meadow under different grazing gradients [J]. Acta Prataculturae Sinica,2008,17(5):9-15.